

LHAASO-KM2A 电磁粒子探测器的 性能监测和标定

报告人：吕洪魁

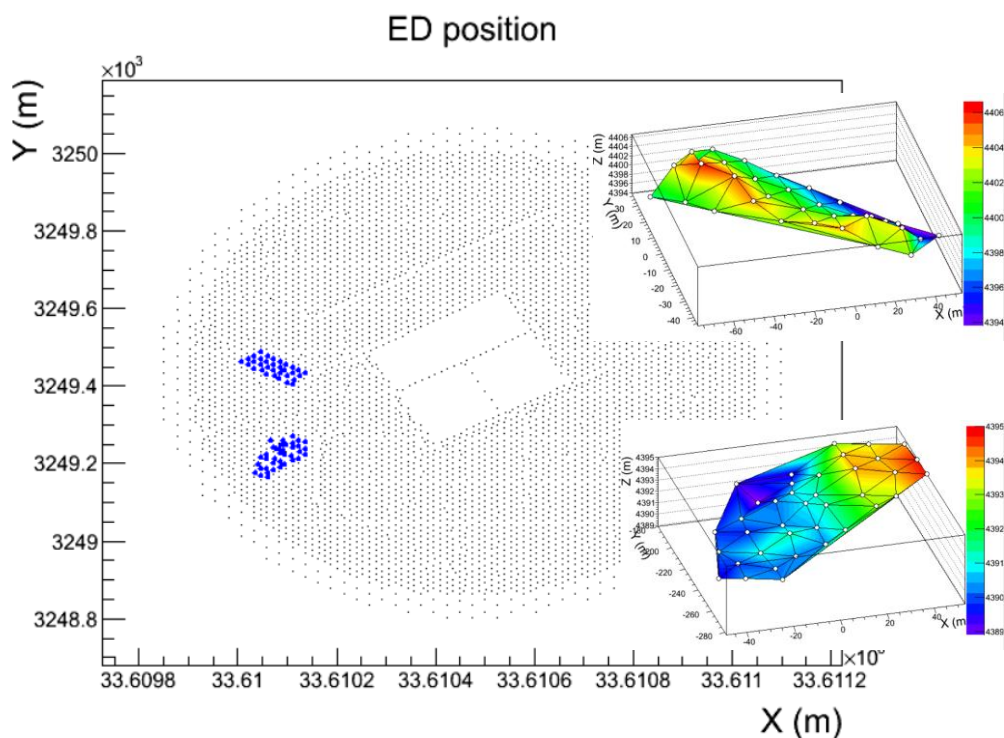
中国科学院高能物理研究所

提纲

- 01** 简介
- 02** 数据质量监测系统
- 03** 阵列监测结果显示
- 04** 探测器时间标定
- 05** 总结

KM2A电磁粒子探测器阵列安装及运行情况:

- 2018年2月, 在稻城海子山完成了第一批 33 台 ED 安装; 2018年12月, 第二批 41 台 ED 定位安装完成;
- 首批 33 台 ED 从 2018年 2 月运行近一年, 拓展的 74 ED + 10 MD 从 2019年 1月 联合运行至 3月15日;
- ED 数据质量监测和标定工作也在持续进行, 通过数据监测系统发现并及时解决了一些探测器、DAQ 等存在的潜在问题;



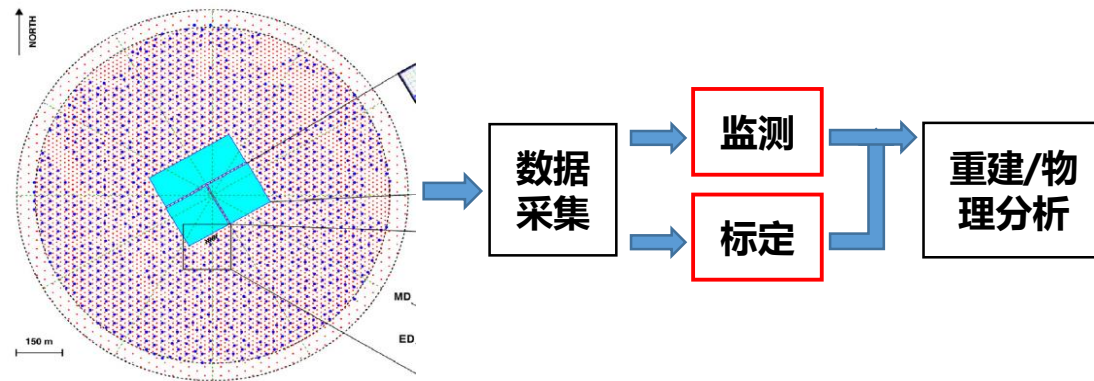
■ 74 台 ED 在全阵列中的位置



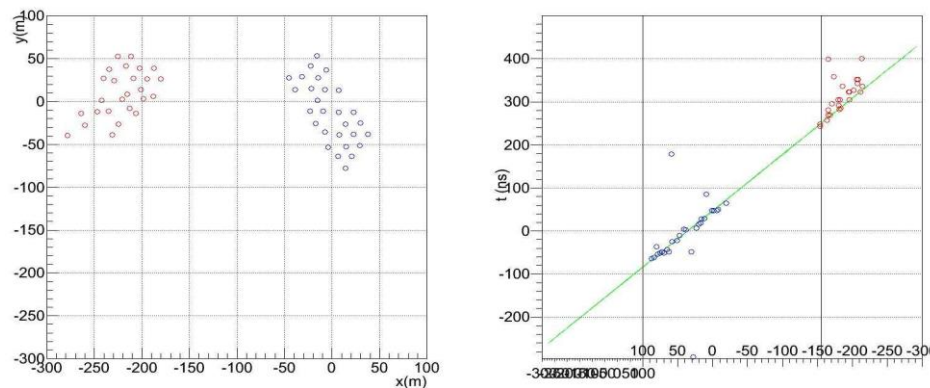
■ 首批安装的 33 台 ED

- 运行触发模式：33 ED采用 ≥ 5 ED着火@200ns；相应触发率~45Hz，每天累积 3.9×10^6 EAS事例，产生数据量~1.2GB；
74 ED采用 ≥ 5 ED着火@200ns；相应触发率~105Hz，每天累积 9.3×10^6 EAS事例，产生数据量~6.5GB(含 MD 信息)；

- LHAASO-KM2A 全阵列共 5242 个 电磁粒子探测器(ED)，1171个 缪子探测器(MD) 组成，分布在一平方公里范围内；
- 由于探测器规模、数据监测量、分析工作量都将超过已往 EAS 阵列实验的量级，数据质量监测和探测器标定作为**保证探测器正常稳定运行和物理结果准确的第一道屏障**，将成为一项关键而庞大的系统工程；
- 目前已经形成了一套比较实时、自动化的探测器自刻度方法和数据监测方法，并应用于已建成的 ED 阵列实验中；



□ 数据流示意图；



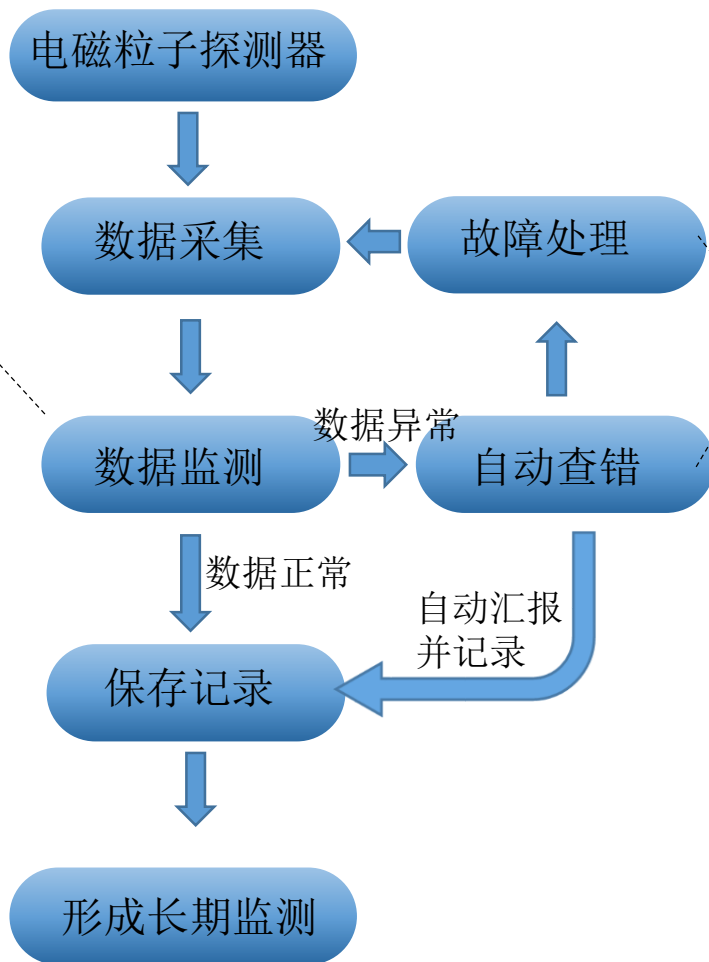
□ 触发全部 ED 的宇宙线事例；

02 数据质量监测系统

- **系统功能：**自动、实时、高效的监控分析探测器性能，及时准确响应探测器异常，并初步排查问题；
- **开发技术难点：**需要充分理解ED的输出信息、统计分布特征，及其随环境的变化(基于硬件经验和前期阵列实验结果)；

➤ 系统结构：

① **阵列多性能参数分析软件：**全面的性能分析，涵盖探测器阵列不同层面的性能信息(触发率、输出电荷量等)共十余项

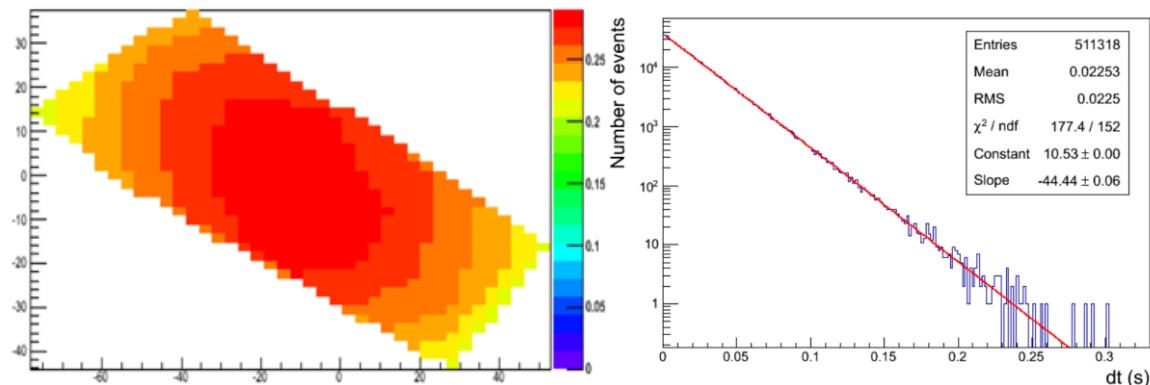
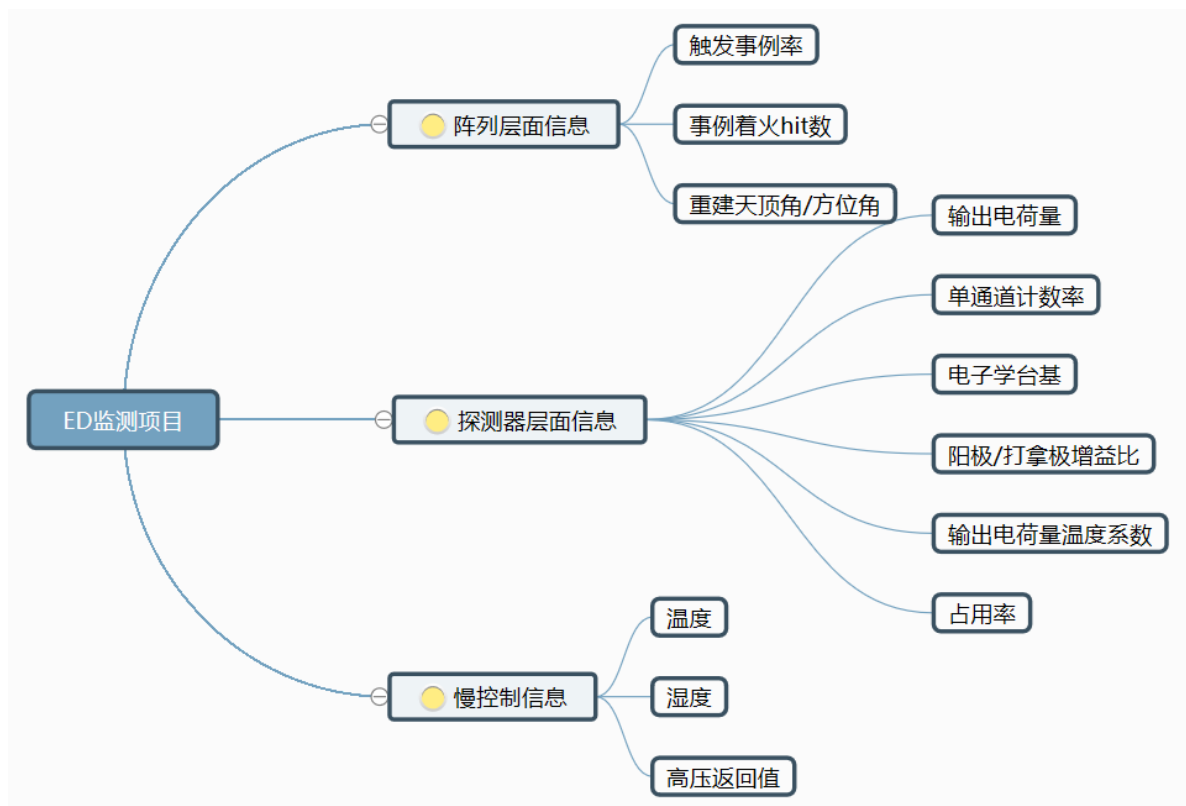


② **探测器自动查错、警告系统：**适应未来大规模实验的需要，建立探测器异常问题排查、自动警告机制，形成异常问题记录，实现全自动化

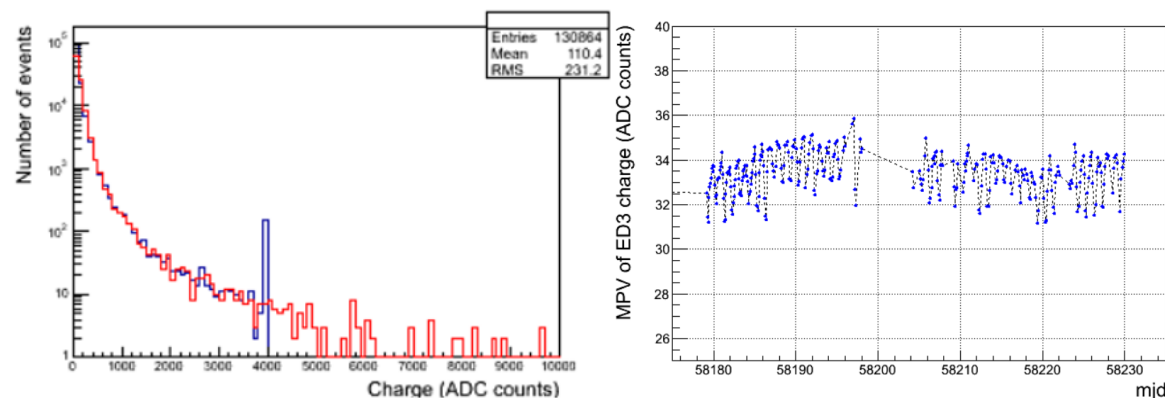
③ **环境参数监测系统：**监控外部环境(气压)、探测器内部环境(温湿度)，辅助理解探测器性能随环境的变化

02 数据质量监测系统：多性能参数分析软件

- **监测分析过程：**在阵列实验运行过程中，每隔一段时间，从离线数据中获取到探测器不同层面(阵列重建、探测器输出、慢控制等)的信息，对探测器输出信息建立统计直方图、二维散点图等，并通过统计分布特征及拟合参数来监测 ED 性能状态；
- 平均监测时间间隔(~1 hour/1 point)，全阵列建成后每天统计分析的直方/散点图数目超过 10^5 ；需要一套高自动化的监测分析系统；



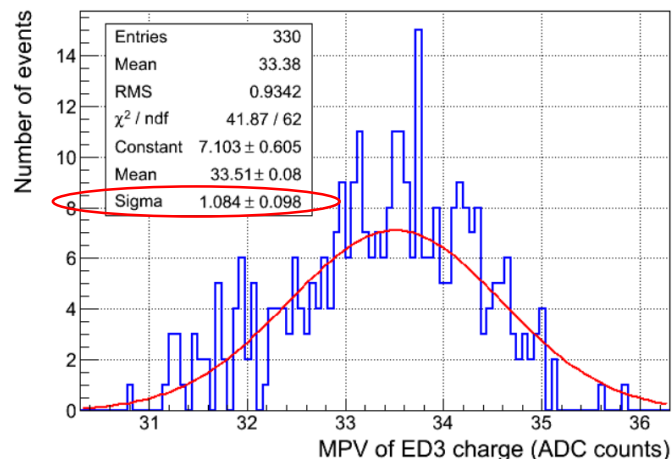
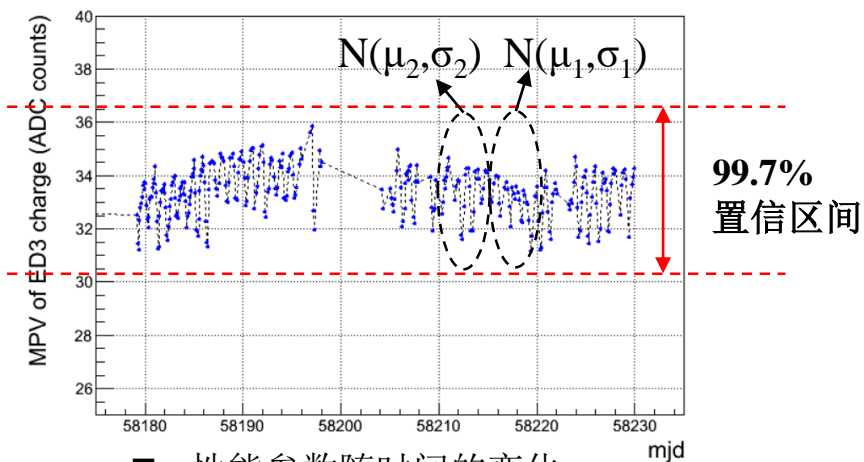
- 左图：ED 占用率随位置分布；
- 右图：事例时间间隔分布，由此得到阵列触发率 ~ 44 Hz；



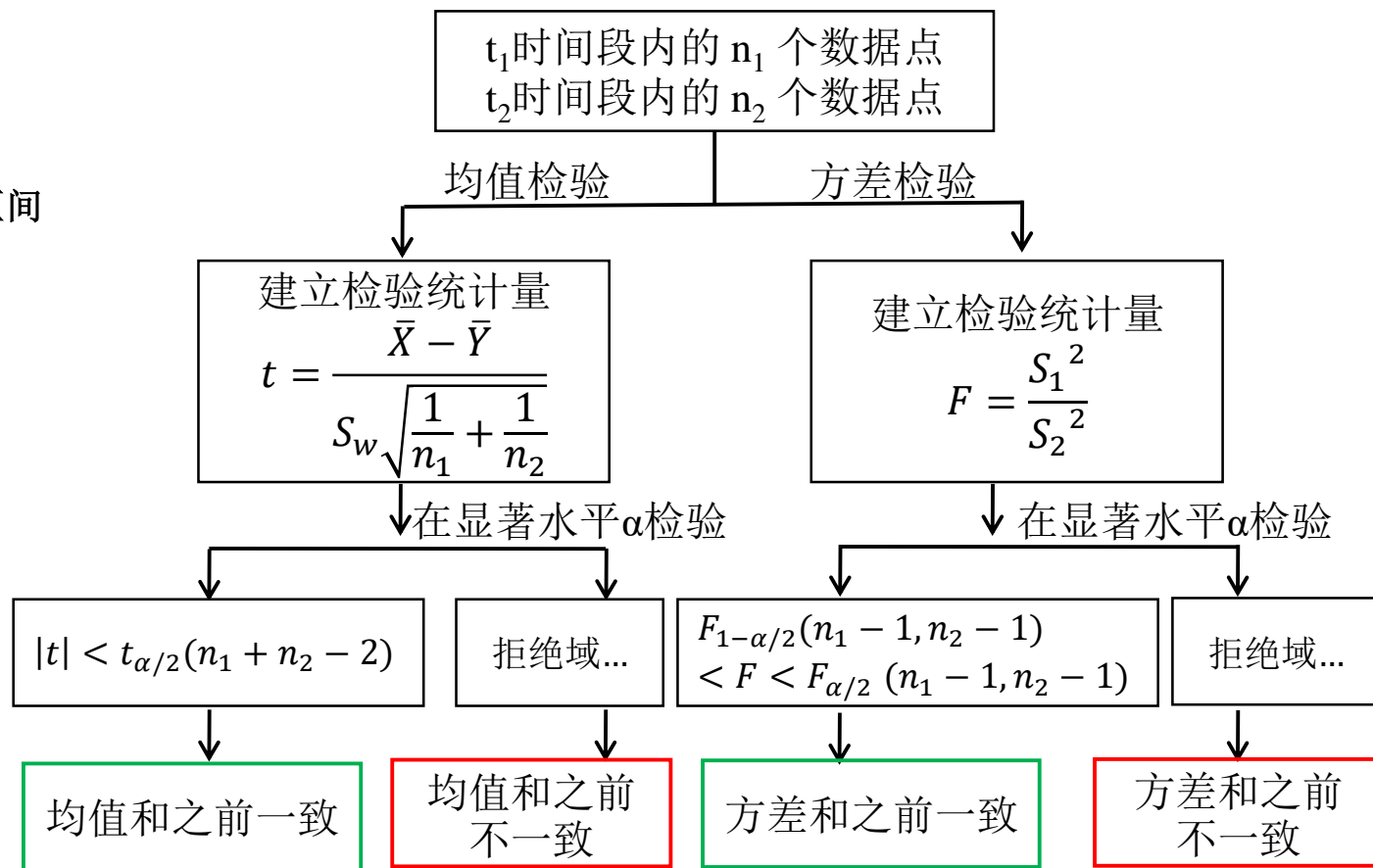
- 左图：探测器 (ID. 25) 输出电荷量分布；
- 右图：探测器 (ID. 3) 输出电荷量峰位值随时间的变化；

02 数据质量监测系统：自动查错、警告系统

- 对探测器异常问题给出警告信息，排查问题原因，并进行初步处理 (假设每台ED 一年发生一次故障，每天要处理 14 个问题);
- 异常情况判断: 1). 设置警戒阈值条件: 判断性能参数是否超越警戒线;
- 2). 假设检验: 当前时间段内探测器的数据统计分布和之前数据相比, 是否发生变化;



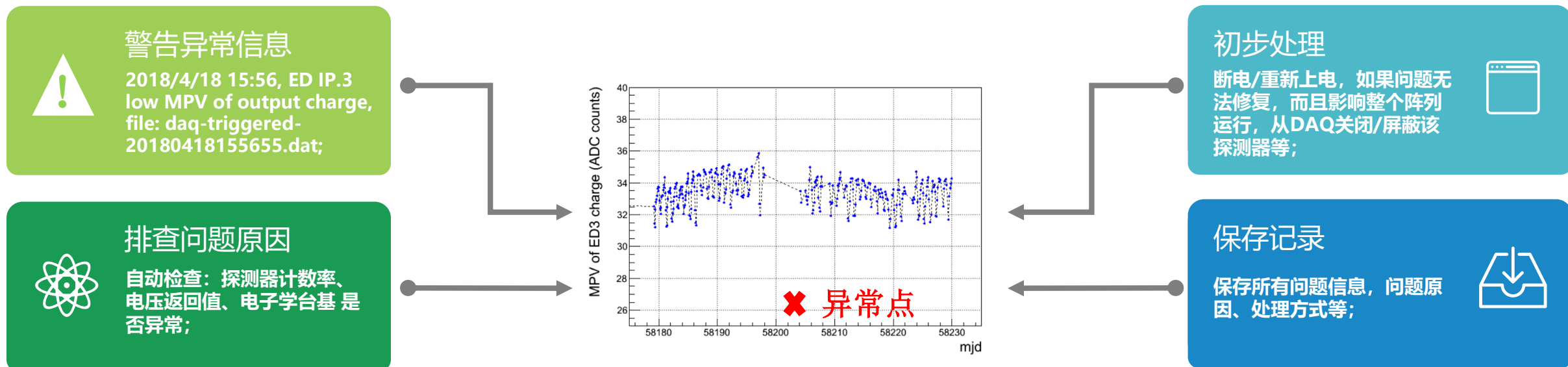
■ 建立性能参数统计样本, 高斯拟合得到标准偏差;



■ 假设检验方法判断不同时间段的数据分布是否发生变化;

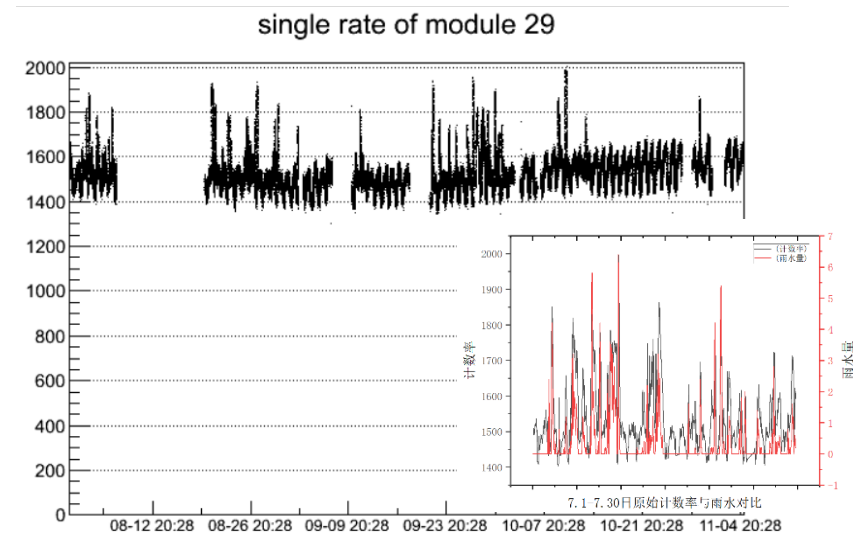
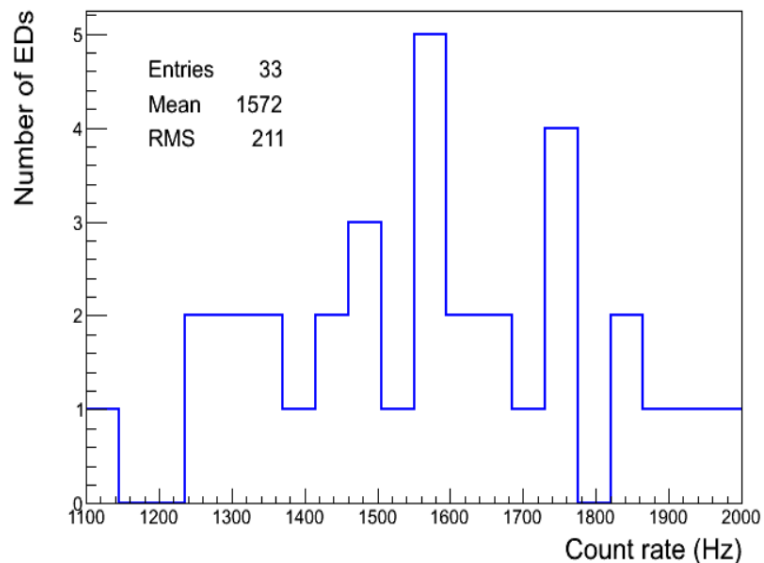
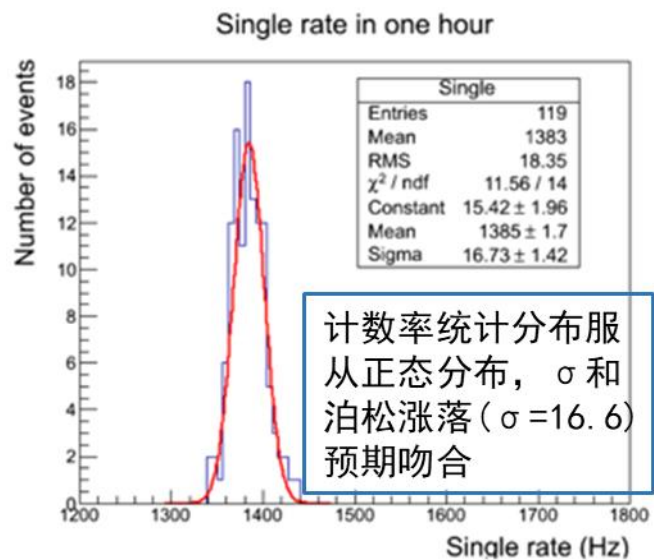
02 数据质量监测系统：自动查错、警告系统

- 异常情况处理：
- 1).发出警告信息：返回异常数据文件名，数据生成时间，异常信息情况；
 - 2).排查问题原因：自动检查异常时间段的探测器 / 慢控制(电源状态 / 高压返回值 / 温湿度)等初级信息辅助判断；
 - 3).初步处理：对于查明原因的异常问题，检索错误信息库找到处理方式，并进行初步处理；
 - 4).保存记录；



03 监测结果 (33 ED 阵列阶段)

- 1. **单通道计数率**: 单位时间内单路 ED 着火(即信号超过阈值)次数 ($R = \frac{N_{hit_i}}{t}$)。该值和探测器所在海拔的环境中的本底粒子, 及探测器阈值有关;
 - 在线监测: 由数据获取系统(DAQ)根据每台 ED 通道的数据传输量实时计算得到;
 - 离线监测: 从某一段时间的数据中, 统计该时段内某探测器信号过阈次数, 除以有效曝光时间得到;
 - 监测结果: 计数率涨落符合泊松涨落预期, 33台 ED 计数率在2 kHz以内, 不同 ED 计数率变化趋势接近;

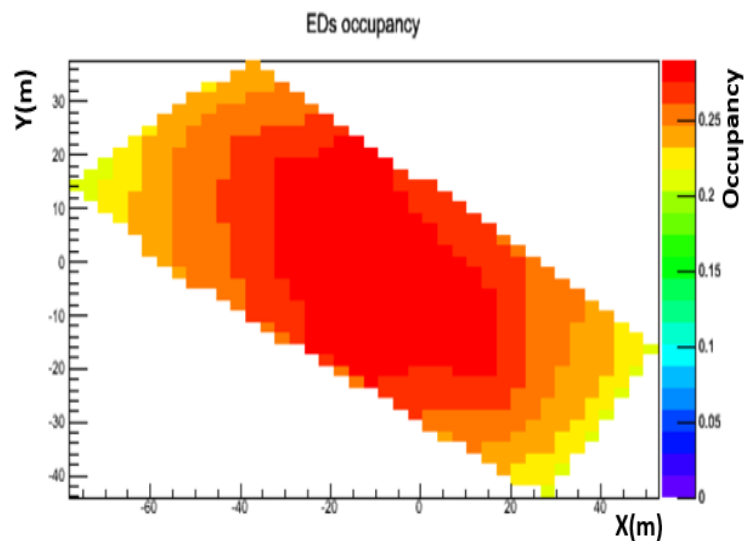


- 在线计数率(5秒平均值)的统计分布
- 33台ED计数率统计分布(数据时间: 2018年11月5日)
- ED 计数率变化图(数据时间: 2018年8月1日至11月5日)

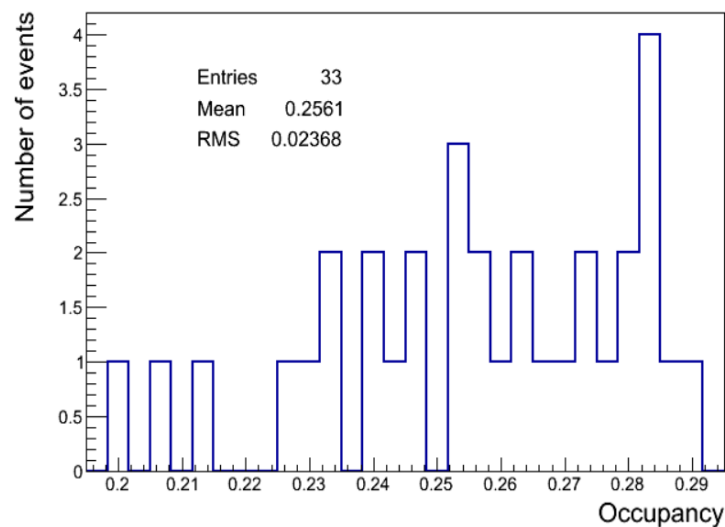
03 监测结果 (33 ED 阵列阶段)

2. 占用率(Occupancy): 每次触发事例中某个探测器被击中(信号过阈)的概率; 阵列触发条件;

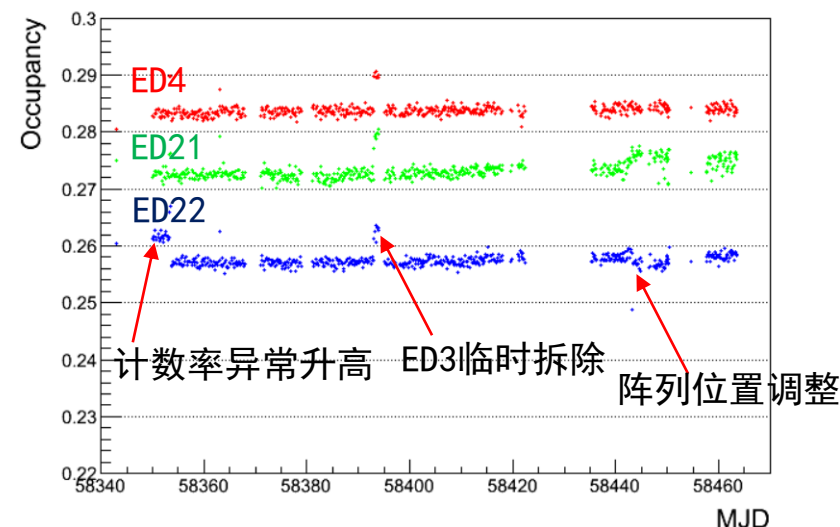
- 监测方法: 选取一段时间的阵列运行数据, 统计该时段内某探测器信号过阈次数, 除以该时段内阵列触发的次数得到某探测器的占用率;
- 监测结果: 占用率在20%以上, 平均25.6%。占用率随阵列中心到阵列外围逐渐变低, 探测器的响应和阵列的触发情况正常;



■ 33 台 ED 占用率随位置的分布



■ 33台ED占用率统计分布(数据时间: 2018年11月5日)

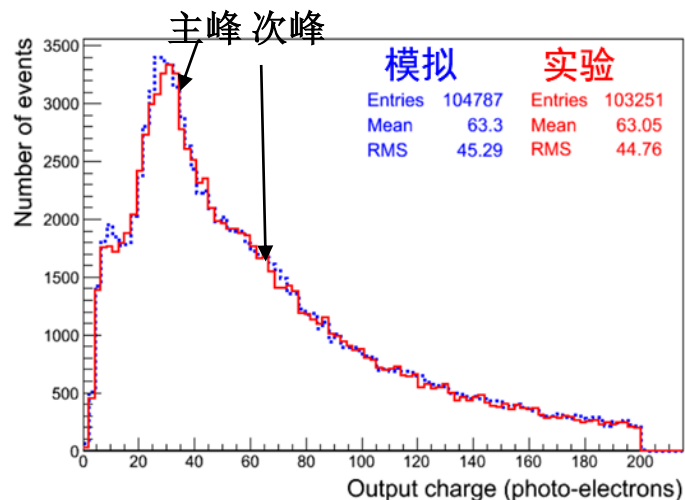


■ ED 占用率变化图
(数据时间: 2018年8月至12月)

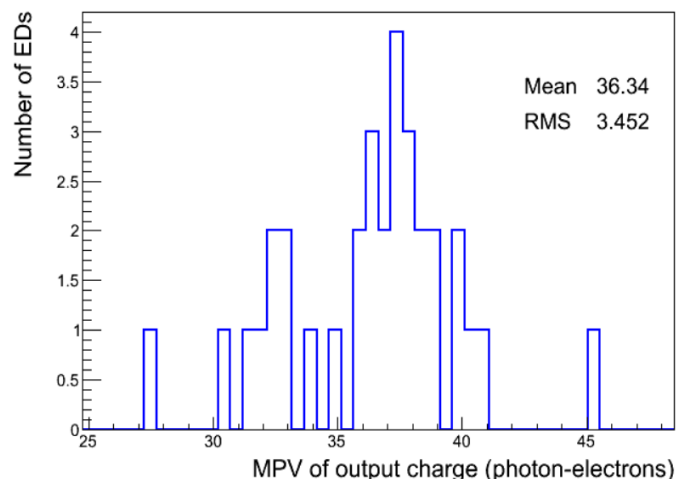
03 监测结果 (33 ED 阵列阶段)

3. 输出电荷量: ED 探测器信号过阈时, 电子学对PMT产生的信号进行积分处理后, 给出积分电荷量;

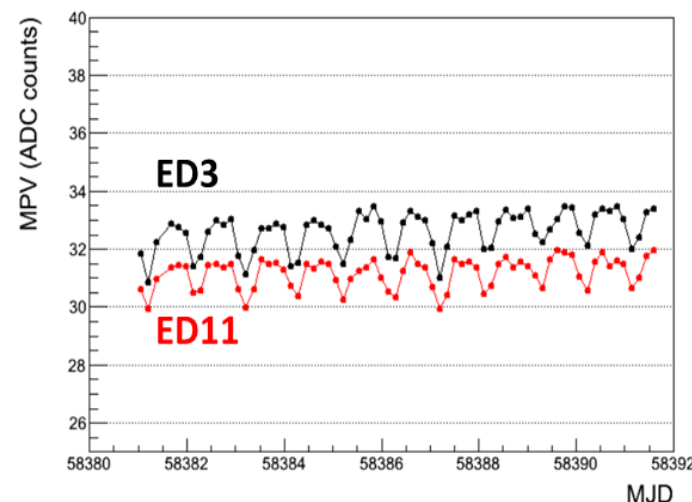
- 监测方法: 由于探测器信号本身有统计涨落。从一段时间(3~4小时)的数据内, 利用 EAS 前锋面次级粒子击中探测器产生的信号, 获取输出电荷量的统计分布, 拟合该分布得到峰位值(即MPV值);
- 监测结果: ED 输出电荷量近似朗道分布, 在~30 count处有一个主峰, 主要由EAS电子在闪烁体内沉积能量产生。两倍主峰的位置叠加一个次峰, 是光子经过铅版发生对作用产生两个电子, 并在闪烁体沉积能量产生。实验结果和模拟结果吻合, 分布平均值差别0.69%, ED 响应正常;



■ 单台 ED 输出电荷量分布



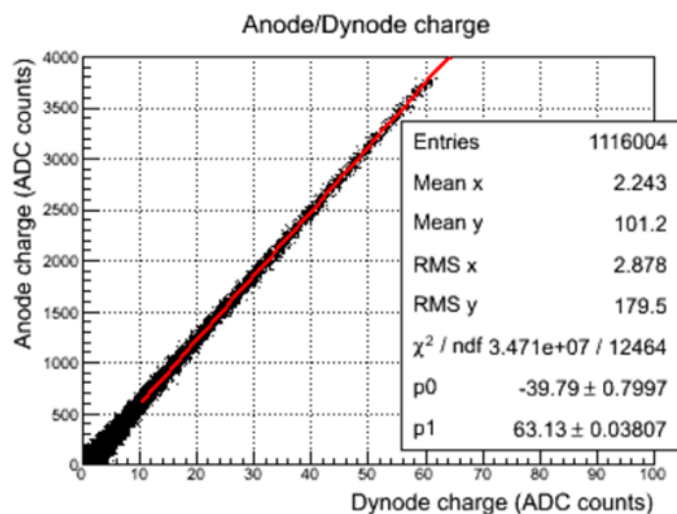
■ 33台ED输出电荷量峰位值统计分布



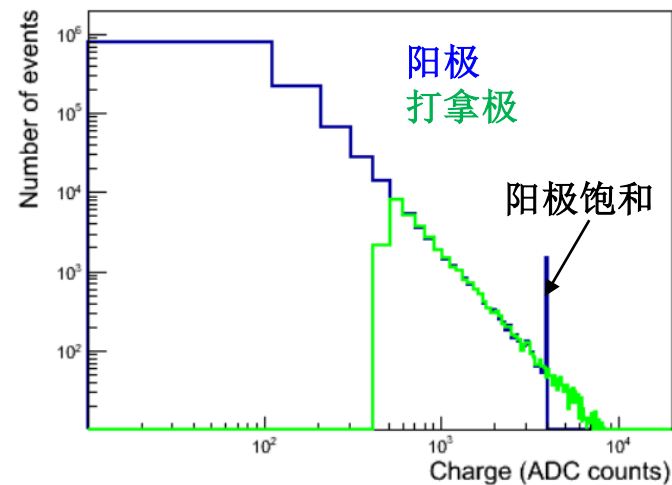
■ 两台 ED 输出电荷量MPV值随时间的变化 (数据时间: 2018年9月21号至10月1号)

03 监测结果 (33 ED 阵列阶段)

4. **阳极/打拿极增益比:** ED内部PMT为双路读出模式, 以满足探测器动态范围的要求, 阳极饱和后, 打拿极对大动态范围粒子数进行测量。探测器信号过阈时, PMT阳极/打拿极双路同时产生信号, 电子学对两路信号分布进行积分得到电荷量, 两路信号在PMT线性响应区间内, 其积分电荷量相对比值固定;
- 监测方法: 从一段时间的数据内, 利用EAS前锋面次级粒子击中探测器产生的信号, 拟合得到阳极、打拿极电荷量的比值。结果显示, 阳极、打拿极信号积分电荷量成线性关系, 拟合得到两路增益比值;
 - 监测结果: 利用线性拟合得到的参数, 对阳极、打拿极电荷量进行量程对接, 两路信号在线性重叠区间测量一致, 信号测量正确;



■ 阳极/打拿极 输出电荷量相关性



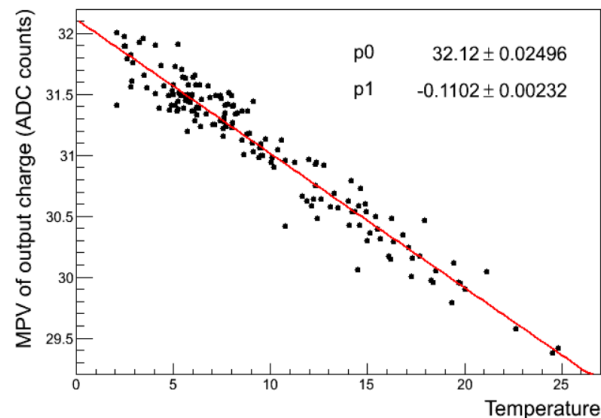
■ 打拿极、阳极输出电荷量分布

03 监测结果 (33 ED 阵列阶段)

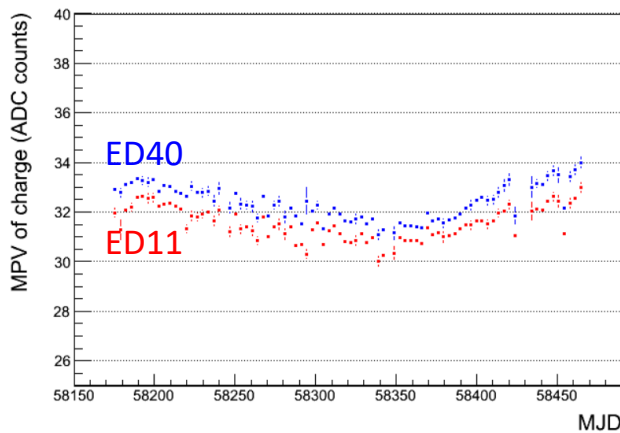
5. **温度系数:** 经过一段时间的运行, 监测探测器输出电荷量的MPV值随探测器温度的变化。从长时间监测数据中, 输出电荷量和温度表现出强相关性, 用线性函数拟合得到温漂系数;

监测结果: 33台ED输出电荷量的相对温度系数在0.5%以内, 平均值为-0.29%;

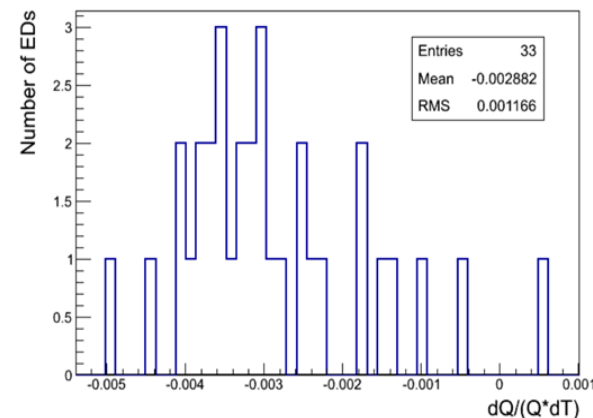
利用温度系数结果, 对ED输出电荷量MPV值的长期变化进行温度补偿。结果显示, 扣除温度对信号测量的影响, ED的本征性能在半年后变化约1%, 探测器性能稳定。



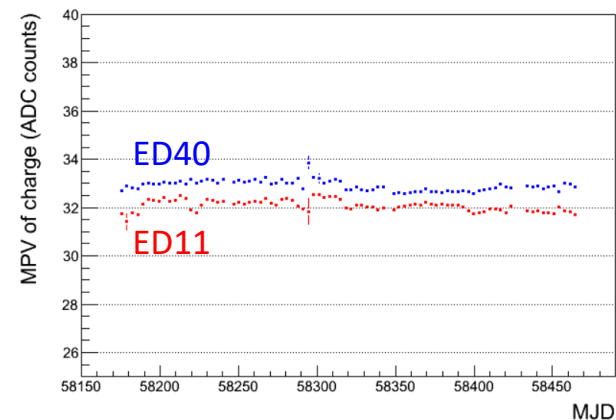
■ 单台ED输出电荷量MPV值和温度的相关性 (9月份数据)



■ 3台ED输出电荷量MPV值随时间的变化 (数据时间: 2018年2月至12月)



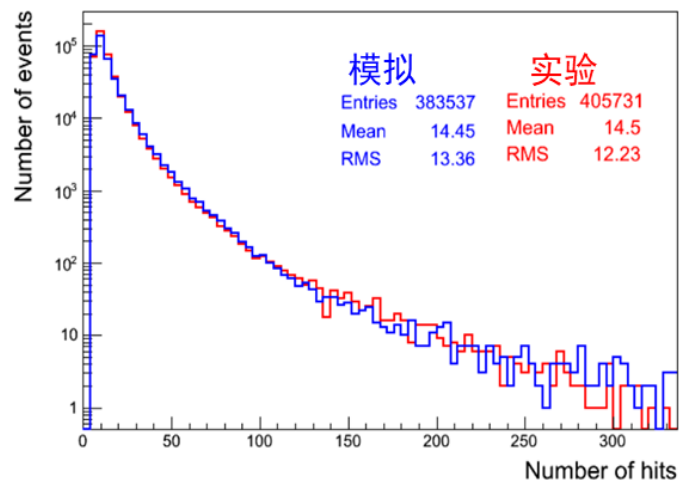
■ 33台ED输出电荷量MPV的相对温度系数



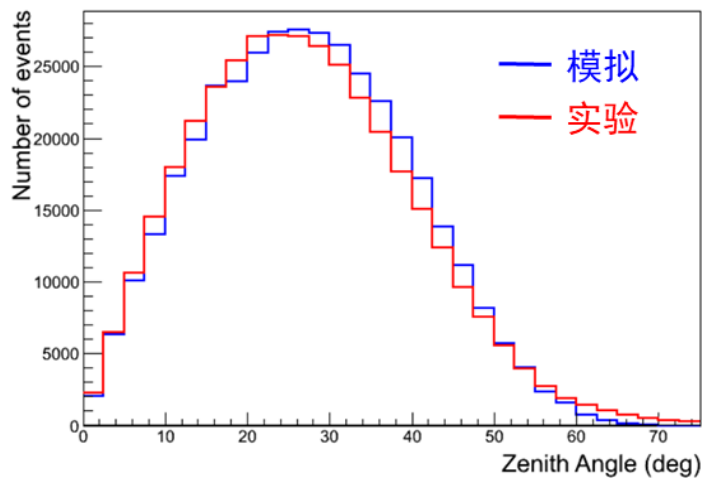
■ ED输出电荷量MPV值(做温度补偿后)的变化 (数据时间: 2018年2月至12月)

03 监测结果 (33 ED 阵列阶段)

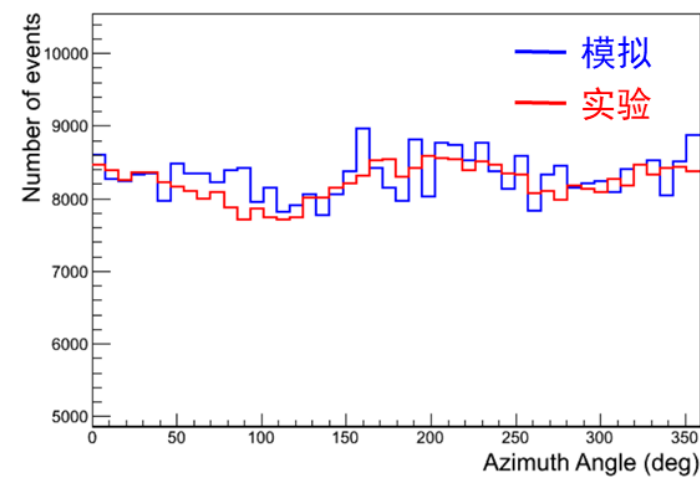
- **EAS 事例着火 hit 数:** 对每次触发事例所有 ED 的信号过阈总次数进行统计, 得到 EAS 事例着火hit数分布。实验数据和模拟结果吻合, 阵列运行状态正常;
- **重建方向信息:** 阵列触发后, ED 对 EAS 次级粒子的粒子数和到达时间进行测量。利用次级粒子到达时间和前锋面进行最小二乘拟合得到原初粒子的天顶角、方位角, 经过一定数据量统计给出分布图。实验重建天顶角、方位角和模拟一致; 方位角存在一定的调制, 和阵列的几何结构有关;



■ EAS事例着火hit数分布



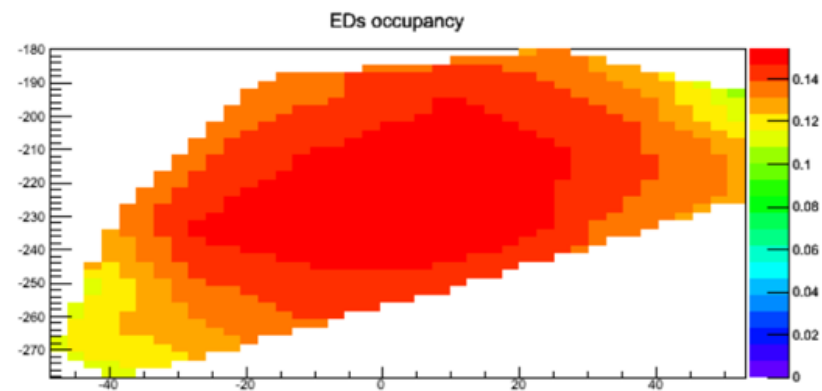
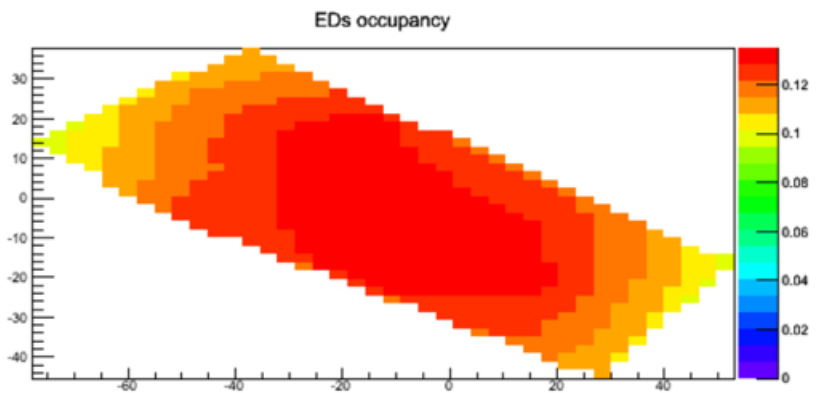
■ EAS事例重建天顶角分布



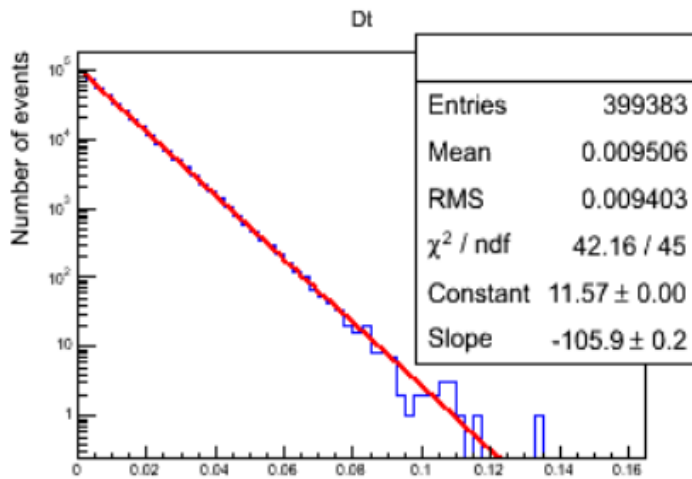
■ EAS事例重建方位角分布

03 监测结果 (74 ED 阵列阶段)

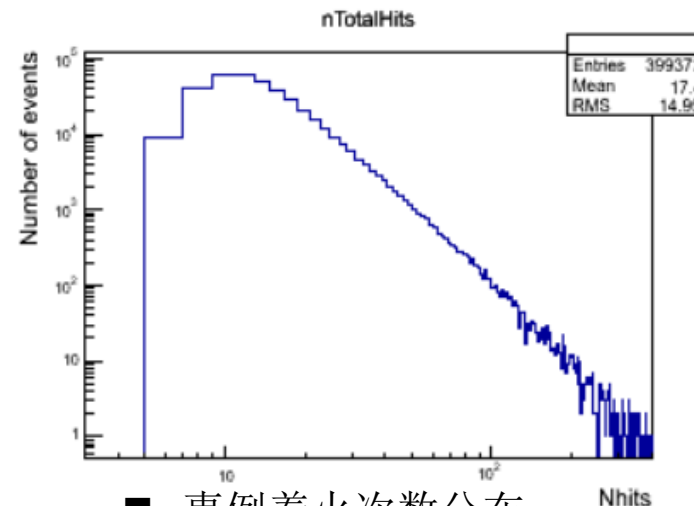
➤ 监测程序随工程建设升级拓展到 74 台 ED 监测;



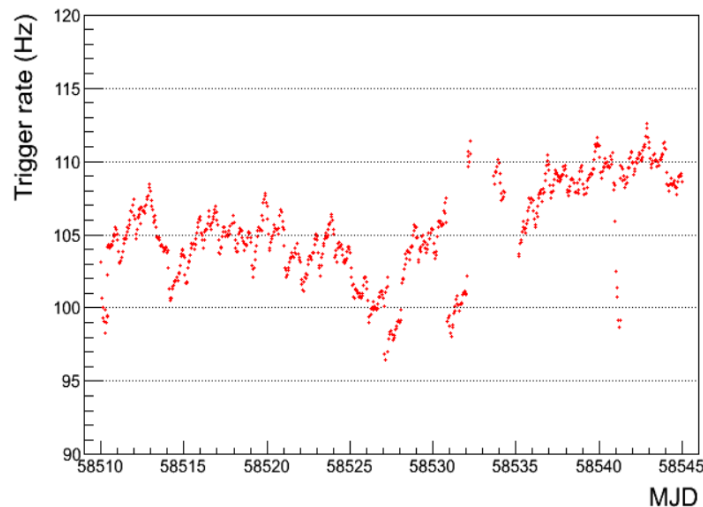
74 ED 占用率随位置的分布;



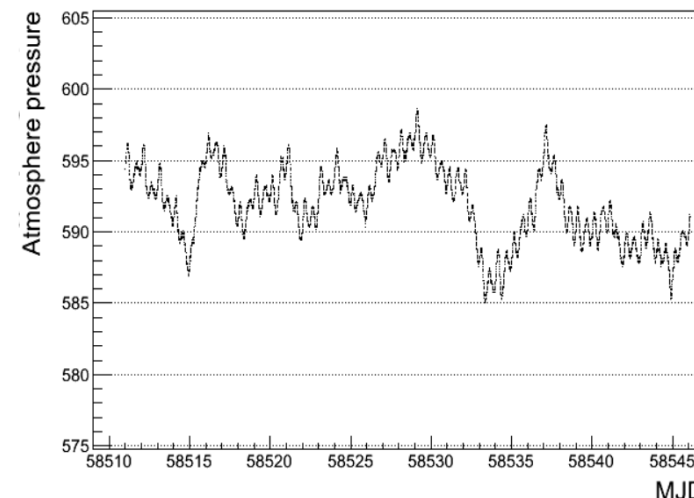
■ 相邻事例时间间隔分布; dt (s)



■ 事例着火次数分布;



■ 阵列触发率随时间变化 (数据时间: 2018年1月至3月);



■ 稻城气象站大气压 (数据时间: 2018年1月至3月);

03 监测结果(自动查错和存储记录)

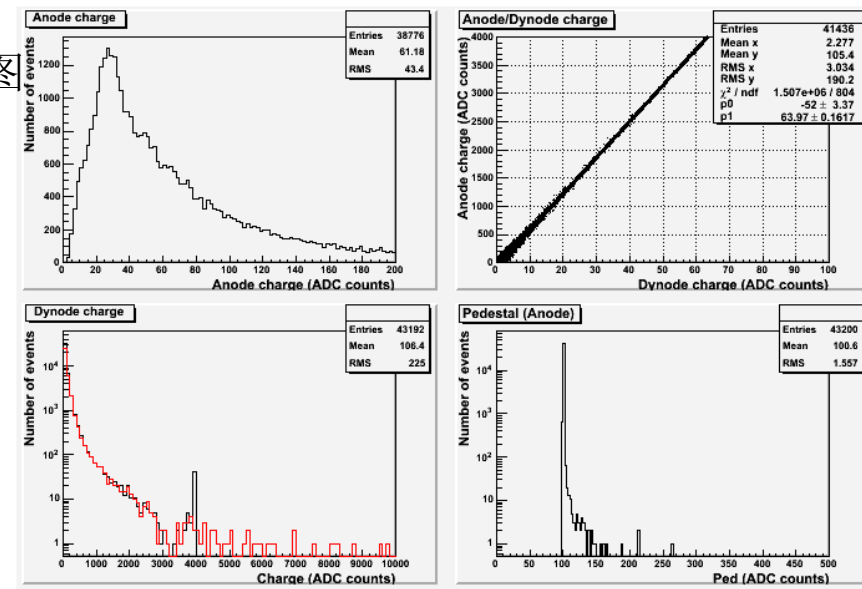
- 监测结果目前以图片、root文件、记录形式存储；目前仍是手动提交作业处理，结果存储在个人目录下；程序功能完善后，将定时自动提交作业处理，结果存在公共目录下；

监测结果图存储

```
(ybjslc05)/eos/user/w/wangzheng/ED-2019/draw/20190302tanceqixinxi $ ls
c110.png c114.png c119.png c125.png c132.png c13.png c143.png c148.png c19.png
c111.png c115.png c120.png c129.png c136.png c140.png c145.png c149.png c22.png
c112.png c117.png c121.png c12.png c137.png c141.png c146.png c14.png
c113.png c118.png c122.png c131.png c139.png c142.png c147.png c150.png

(ybjslc05)/eos/user/w/wangzheng/ED-2019/draw/2019singlempv $ ls
c110.png c114.png c119.png c125.png c132.png c13.png c143.png c148.png c19.png
c111.png c115.png c120.png c129.png c136.png c140.png c145.png c149.png
c112.png c117.png c121.png c12.png c137.png c141.png c146.png c14.png
c113.png c118.png c122.png c131.png c139.png c142.png c147.png c150.png
```

探测器监测图

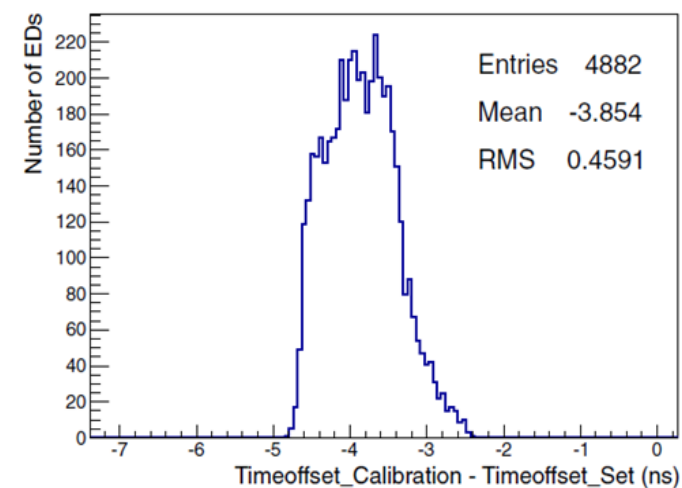
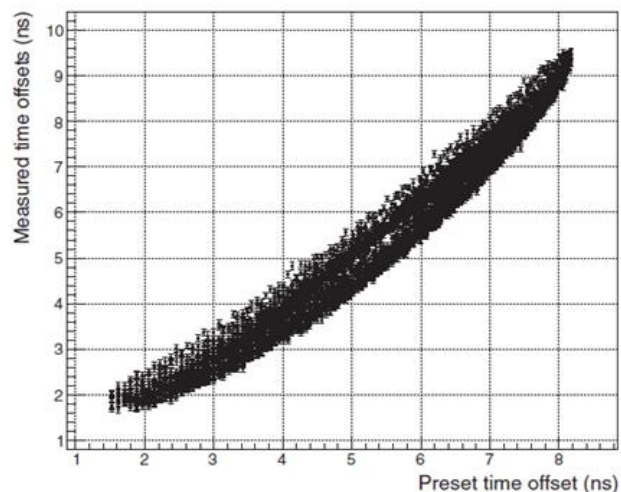
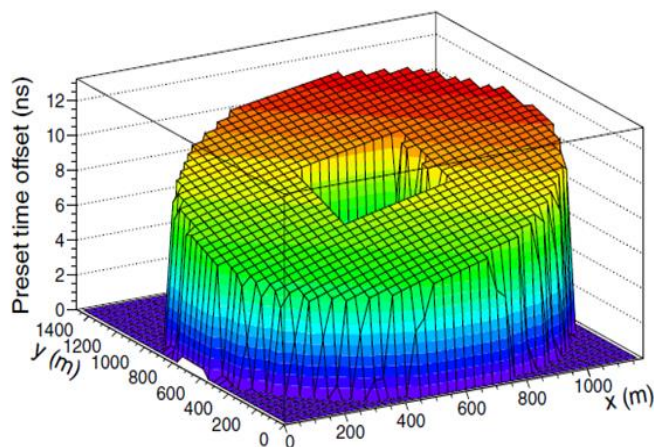


- 自动检查数据点异常：在离线数据分析过程中，对探测器坏通道或正常分布范围区间之外的数据点进行筛选（数值为0的点和超出 $\text{mean} \pm 3\text{rms}$ 的点），进行报错和信息存储；

```
Channel: 2, single_rate: 1405.84, mjd: 1.2244e-312, position( Entry$ in ROOT ): 383
Channel: 2, mpv: 0, mjd: 1.2244e-312, position( Entry$ in ROOT ): 564
Channel: 2, single_rate: 0, mjd: 1.2244e-312, position( Entry$ in ROOT ): 564
Channel: 2, mpv: 0, mjd: 1.2244e-312, position( Entry$ in ROOT ): 564
Channel: 3, single_rate: 1399.84, mjd: 1.2244e-312, position( Entry$ in ROOT ): 383
Channel: 9, single_rate: 1038.9, mjd: 1.2244e-312, position( Entry$ in ROOT ): 567
Channel: 9, mpv: 21.4991, mjd: 1.2244e-312, position( Entry$ in ROOT ): 568
Channel: 11, mpv: 0, mjd: 1.04682e-312, position( Entry$ in ROOT ): 239
Channel: 11, single_rate: 0, mjd: 1.04682e-312, position( Entry$ in ROOT ): 239
```


04 探测器时间标定 (全阵列)

- LHAASO 在阵列规模、探测器性能方面 超越了很多已往地面 EAS 阵列实验，标定精度和效率 具有更高的要求；
- **特征面法**：在阵列大规模运行取数阶段，利用 EAS 前锋面次级粒子到达时间来刻度(校准)探测器的相对时间，实现 5242 台电磁粒子探测器 (ED) 的 亚纳秒精度的时间标定；
- **标定方案验证**：模拟中预设的时间偏置量(time-offset)和标定出的结果显示出相关性，预设值和标定值的残差分布宽度 RMS=0.46 ns，标定精度到达要求。



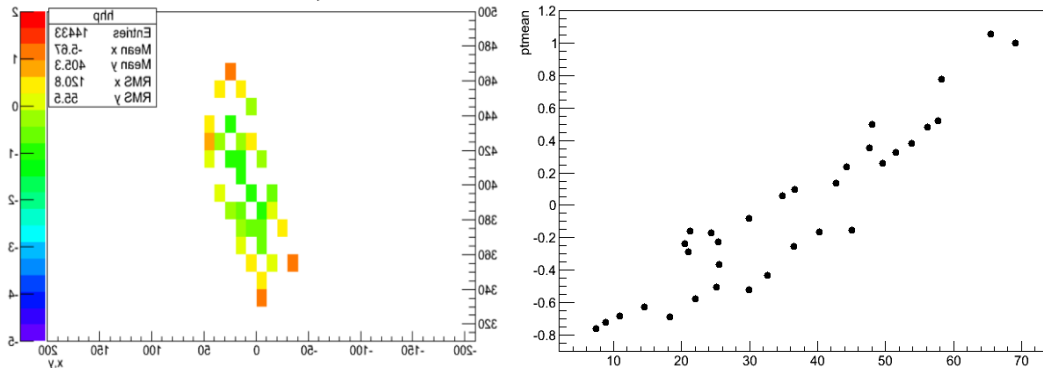
- 数据模拟中，为每台ED预设的时间偏置量
- 全阵列ED的time-offset预设值和标定值的相关性
- ED的time-offset预设值和标定值的差异分布

结果已发表在 *Astroparticle Physics*;

04 探测器时间标定 (33 ED 阵列)

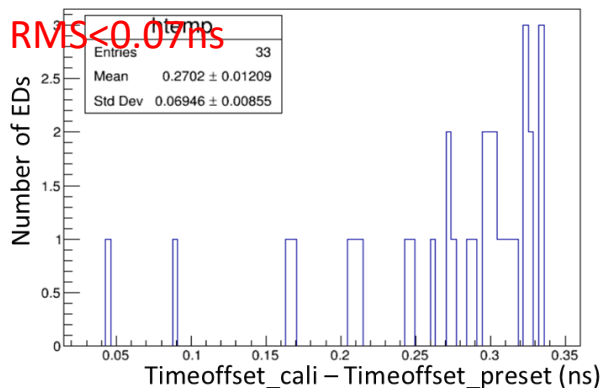
- 误差来源分析: 1) 对前锋面描述不准确, 通过优化锥面拟合参数控制; 2) 对EAS真实方向估计不准确, 通过特征面修正消除;
- 标定精度优化: 在33 ED 阵列模拟数据中, 采用不同描述方式对EAS前锋面拟合, 给出系统误差 (平面拟合精度 ~ 0.5 ns; 锥面拟合精度 < 0.3 ns); 优化标定参数后, 目前最佳精度达到 ~ 0.1 ns;

■ EAS平面拟合导致的系统误差

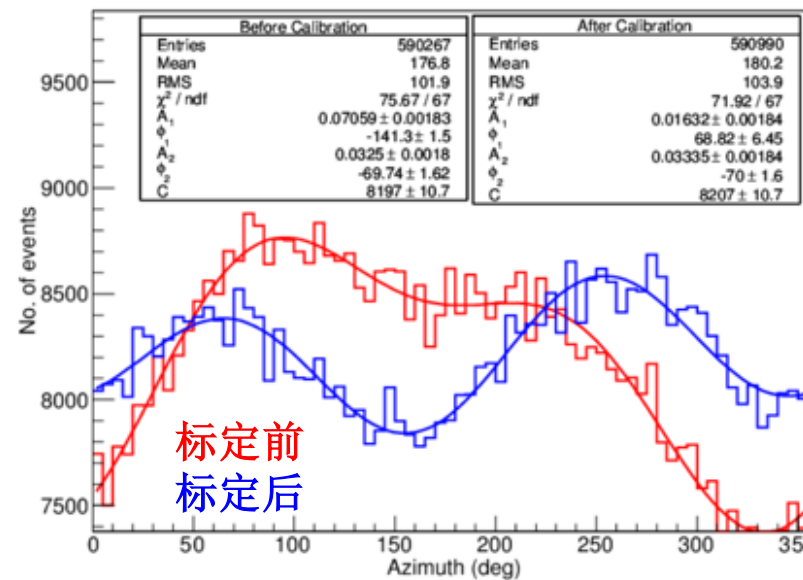


■ EAS锥面拟合的标定精度

最佳精度: $RMS < 0.07$ ns



■ 标定前后方位角分布



05 总结

- 数据监测方面：面向阵列实验需求，开发了自动、实时的阵列数据智能监测系统；
- 新系统已应用于目前在运行 ED 阵列实验中，将继续完善监测系统功能：
 - 1)多参数分析软件：丰富监测参数，如时间性能信息；
 - 2)自动查错系统：加入假设检验方法；
- 标定工作方面：标定方案经过验证，精度满足实验需求，并在33 ED 阵列实验中使用；
- 继续优化标定精度，尝试更多的标定方法；

